

道路交通碳排放权交易研究现状与展望

李 晔, 李文翔, 魏愚葵

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 道路交通碳排放由于占比大且持续增长已成为全球气候变化治理的焦点。面对现有减排政策的不确定性与反弹效应, 基于总量控制与市场机制的碳排放权交易将成为未来道路交通碳排放治理的重要手段。综述了道路交通碳排放权交易的研究现状, 根据碳排放权交易受控主体不同, 将其分为上游、中游、下游 3 种交易机制, 分别论述了这 3 种机制的研究进展, 并对比总结了各自的配额原则、作用机理与优缺点。为实现道路交通碳排放 3 个驱动因素即燃料排放因子、车辆能耗强度、交通活动需求的协同优化, 提出建立政府—企业—居民协同共治的道路交通碳排放权交易机制的政策建议, 并分析了其基本原理以及未来的研究方向。

关键词: 碳排放权交易; 道路交通; 市场机制; 协同共治

中图分类号: F511.0

文献标志码: A

Research Progress and Prospect of Road Transport Carbon Emissions Trading

LI Ye, LI Wenxiang, WEI Yuao

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Road transport carbon emission is the focus of global climate change governance accounting for a large proportion and continuing to grow. In the face of the uncertainty and rebound effect of existing emission reduction policies, the carbon emissions trading which is based on the total control and market mechanism becomes an important means of controlling carbon emission in road transport sector. This paper reviews the research status of road transport carbon emission trading. According to the main body of emission trading who holds the carbon allowance, the road transport carbon emission trading can be divided into three trading mechanisms: up-stream, mid-stream and down-stream. The progress of these three mechanisms are discussed, and the respective quota principles, mechanisms of action, the advantages and disadvantages are compared. In

order to realize the collaborative optimization on three driving factors of road traffic carbon emission: fuel emission factor, vehicle energy consumption rate and traffic activity demand, this paper proposes to establish a carbon emission trading scheme for road transport sector based on government-enterprise-resident collaborative governance. The principles and future directions of this new scheme are analyzed.

Key words: carbon emissions trading; road transport; market mechanism; collaborative governance

全球气候变化已经引起国际社会的广泛关注, 如何采取有效措施减少温室气体排放正逐渐成为环境、政治、经济领域共同关注的焦点。碳排放权交易作为控制温室气体排放的重要市场机制, 正在全球各国逐步推进实施中。英国于 2002 年建立世界上第一个企业间的碳排放权交易体系, 欧盟于 2005 年建立了世界上首个跨国间的碳排放权交易体系——欧盟排放交易体系(EU ETS), 为全球范围内的其他碳排放权交易体系提供了重要参考。自此之后, 美国、日本、澳大利亚等发达国家内部的区域碳排放权交易体系如雨后春笋般迅速发展起来。中国在 2013 年启动碳排放权交易试点, 期间 7 个试点省市陆续制定了适用于当地的碳排放权交易管理试行办法, 并取得一定成效。2014 年 12 月, 国家发改委正式出台了《碳排放权交易管理暂行办法》, 并于 2016 年 4 月起草完成了《碳排放权交易管理条例(送审稿)》, 于 2017 年 12 月正式启动全国碳排放权交易市场。

然而, 目前已经实施或即将实施的碳排放权交易市场覆盖范围大多是数据统计基础较好的、减排潜力较大的固定排放源及大型企业, 如电力、钢铁、石化、化工等部门, 而未包括碳排放增长最快的交通部门。随着未来碳排放权交易市场的完善以及移动

收稿日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(71774118, 91546115); 上海科技创新行动计划(16511105204)

第一作者: 李 晔(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为低碳交通规划、慢行交通、交通政策。

E-mail: jamesli@tongji.edu.cn

通讯作者: 李文翔(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为新能源交通。E-mail: lwxfiff@gmail.com

排放测算技术的进步,将道路交通部门纳入碳排放权交易体系成为可能。

1 道路交通碳排放权交易发展需求

根据国际能源署(IEA)研究报告^[1],2014 年全球交通部门排放 CO_2 75.47 亿 t,占据全球能源消耗 CO_2 排放的 23%,仅次于电力及供暖部门,是全球第二大碳排放部门,也是增长最快的能源消耗部门。预计到 2030 年这一比例将提高到 41%。我国碳排放总量当前位居全球第一^[2]。由于我国经济社会正处于发展阶段,交通部门的碳排放量占全社会碳排放量的比重相对较低,但仍是碳排放的主要来源之一,其中道路交通碳排放更是占据了交通部门碳排放的 86.32%^[3]。因此,道路交通部门成为我国环境治理的重点关注领域^[4]。

道路交通碳排放可分解为燃料排放因子、车辆能耗强度、交通活动需求 3 个影响因素的乘积^[5],分别对应燃料供应企业(包括加油站、加气站、加氢站以及为新能源汽车提供电能的充换电站运营企业等)、汽车制造企业(包括化石燃料汽车与新能源汽车制造企业)、汽车使用者(包括私人小汽车出行的居民与运输企业)这 3 类异质作用主体,其对应关系如图 1。其中: G 表示碳排放总量(CO_2 当量),t; A_i 表示第 i 类交通工具的活动量,km; I_i 表示第 i 类交

通工具的能耗强度, $\text{MJ} \cdot \text{km}^{-1}$; F_j 表示第 j 类燃料的排放因子, $\text{t} \cdot \text{MJ}^{-1}$ (CO_2 当量)。

由图 1 可知,任何道路交通碳排放治理的政策措施都将作用于这 3 类主体,进而控制其对应的影响因素。例如,2017 年 9 月 13 日,由国家发展和改革委员会、国家能源局、财政部等 15 部委联合发布了《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》,提出“到 2020 年,在全国范围内推广使用车用乙醇汽油,基本实现全覆盖”,该政策将促使燃料供应企业通过改变燃料成分比例、使用生物燃料及可再生能源来降低燃料碳含量,进而降低燃料排放因子。再例如,2017 年 9 月 28 日,工业和信息化部等 4 部委联合发布了《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》,分别针对乘用车企业平均油耗与新能源比例提出了指标性的考核要求与积分管理制度,该政策将促使汽车制造企业通过提高燃油车效率或者开发新能源汽车(如纯电动汽车)来降低车辆能耗强度。又例如,2017 年 8 月 8 日,交通运输部、住房和城乡建设部联合发布《关于促进小微型客车租赁健康发展的指导意见》,鼓励分时租赁(俗称汽车共享)发展,该政策将促使汽车使用者减少车辆的使用频率和里程,降低交通活动需求。同时政府决策中土地利用规划、交通基础设施投资建设以及交通方式定价也会影响交通活动需求^[6]。

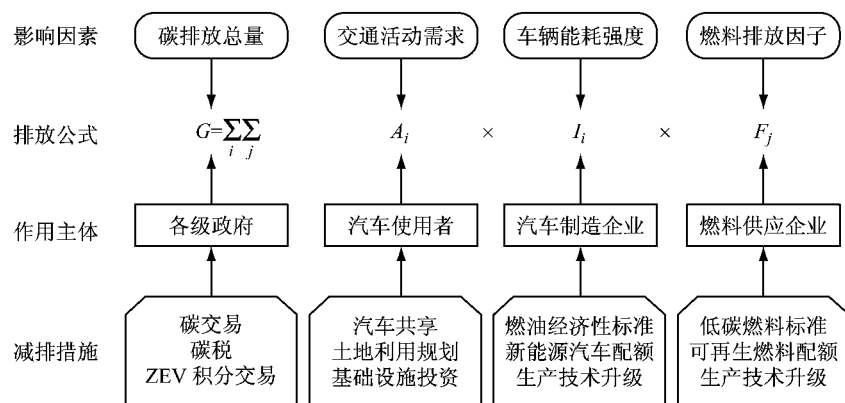


图 1 道路交通碳排放因素分解及其对应减排措施

Fig.1 Factor decomposition and the corresponding mitigation measures of road transport emissions

然而,以上道路交通减排措施大多都具有不确定性和反弹效应,并且只能影响单个因素与主体,无法绝对地保证碳排放总量减少^[7]。例如,燃油经济性标准类政策虽然可以降低车辆能耗效率,但燃油经济性的提高反而可能刺激汽车使用需求的增长。低碳燃料类政策虽然可促进低碳燃料的发展,但不能直接降低高碳燃料的生产,并且无法影响车辆能耗

与交通需求的变化^[5]。同时,由于交通碳排放具有负外部性,以上政策措施并不能使得机动车出行者所付出的个人成本大于其产生的社会影响,因此这就造成了一种社会不公平,而出行者并没有意识到外部性差异,这种不公平将会愈演愈烈,导致恶性循环,道路交通碳排放愈演愈烈。

事实上,空气作为一种公共环境资源,不能仅仅

依赖于政府单一化、碎片化、强制化的治理,而需要由政府、企业、居民共同来分担减排责任,充分发挥市场机制的作用.为了解决上述问题,O'Sullivan 在其经典著作^[8]中提出“谁污染谁治理”的原则,利用经济学原理将交通碳排放的外部性内部化,例如:碳排放权交易、碳税、零排放汽车(ZEV)积分交易^[9]等.这类措施通过政府宏观调控碳排放定价,以价格信号影响企业和居民的行为转变,实现市场的自我调节与优化,并且同时作用于多个主体与因素,可最大效率地促进碳排放减少.

相比其他道路交通减排政策与措施,道路交通碳排放权交易机制更具优势^[10].首先,政府通过设定碳排放总量可以保证交通部门减排目标的实现,克服了非市场机制措施的反弹效应与不确定性,减排效果显著^[11-12].其次,碳排放权交易为受控主体减排提供了最大的灵活性与经济性.例如减排潜力大的企业可通过出售多余的碳配额来获取技术创新的补贴,而减排潜力小的企业则可购买碳配额来完成减排义务.同时,碳排放权交易还可激励企业主动探索研发低碳技术以实现自身利益最大化.因此,基于总量控制与市场机制的碳排放权交易是未来道路交通碳排放治理的重要手段.

2 道路交通碳排放权交易机制研究现状

虽然目前道路交通领域碳排放权交易还未曾在任何国家或地区正式实施,但学术界早已开始了广泛的研究与探讨.根据碳排放权交易受控主体不同,主要分为3种机制^[6, 13-14]:以燃料供应企业为交易对象的上游碳排放权交易机制、以汽车制造企业为交易对象的中游碳排放权交易机制、以汽车使用者为交易对象的下游碳排放权交易机制.

2.1 上游碳排放权交易机制

上游碳排放权交易机制一般是以燃料供应商为交易主体,是目前交通领域讨论最多的一种模式,也是加州气候变化市场咨询委员会(California Market Advisory Committee)推荐的模式^[15].在这种模式下,政府首先制定交通部门的碳排放总量目标,并逐年递减,然后每年以碳配额的方式分配给所有燃料供应企业,燃料供应企业有义务根据配额情况控制燃料供给,并通过技术手段降低燃料排放因子,以此实现减少交通部门能源消耗与碳排放的目的^[12].由于燃料供应企业数量远小于道路上汽车的数量,并

且所有汽车均需要使用燃料,上游碳排放权交易机制理论上可实现以最低的管理成本覆盖最大范围的交通排放源^[16].Grayling 等^[17]也提出在原有燃料税系统的基础上,通过燃料供应企业将道路交通的碳排放纳入欧盟排放交易体系,可相对降低管理难度与成本.例如,在英国只有20家燃料供应企业,却提供了道路交通99%的燃料,据估计英国政府每年只需要支出100万英镑、交通行业每年支出200万英镑即可覆盖碳排放权交易的成本.因此,上游碳排放权交易被认为是一种管理成本低、机制设计简单、政治接受度高的可行方案^[18].

虽然以燃料供应企业作为交易主体的上游碳排放权交易机制可行性较高,但如何保证燃料供应企业减少碳排放是该机制存在的主要问题^[13].实际上,燃料供应企业可采用的减排方式非常有限,除了生产过程中减排,剩下唯一的手段就是改变燃料成分和类型,例如在汽油中混入乙醇等可再生燃料.因此,该机制带来的最大影响就是燃料价格的上涨^[12].而由于人们对于出行的非弹性需求,该机制可实现的实际减排效果非常有限.有研究估计,30美元每吨CO₂的碳配额价格将带来0.27美元的油价上涨,从长期来看仅仅只能够减少5%~7%的燃油消耗^[13, 19].

2.2 下游碳排放权交易机制

道路交通领域讨论的下游碳排放权交易机制大多以小汽车使用者为交易主体.最早出现的形式是燃料配额交易(tradable fuel permit),即:每个居民都持有一定的可交易燃料配额用于交通出行^[20].Keppens 和 Vereeck^[21]提出根据年龄向每个公民分配免费的初始燃料配额,主要分为3类人群:0~18岁(青少年)、18~65岁(成年)、65岁以上(老年),例如6岁儿童的配额会少于25岁成年人的配额.Verhoef 等^[22]认为燃料配额交易是减少道路交通外部性最有效的一种方式,因为它能够刺激人们减少小汽车的使用以及购买更加节能的车辆.Li 等^[23]也证明了在个人碳排放权交易机制下,碳配额价格、个人出行预算以及个人初始碳配额是影响消费选择和使用清洁能源汽车的主要因素.Watters 等^[24]与Harwatt^[25]在英国提出道路交通领域的个人碳排放权交易机制,以促进英国实现到2050年减少60%碳排放(相对于1997年)的目标.在该机制下,政府每年将一半的碳排放总量以配额的形式免费发放给公民,每个18周岁以上的英国公民将获得相等的初始碳配额.另一半的碳排放总量政府通过拍卖的形式

在碳排放权交易市场出售给配额不足的公民, 所得收入用于弥补替代燃料税的税收损失以及发展公共交通. Wadud 等^[26-28]对道路交通领域下游碳排放权交易机制的可行性及其行为响应进行了长期的研究, 结果表明下游作用机制可以使消费者对于价格信号更加敏感, 对消费者行为影响更加明显^[29], 例如改变消费者购车选择^[30]、驾驶行为以及居住选址^[31], 因此可直接促进交通能耗排放的降低.

然而, 仍然有许多学者认为个人碳排放权交易是不切实际的, 由于该系统将带来巨大的交易成本和管理成本, 甚至超过了其带来的效益^[13]. 但 Raux^[32]认为系统的运行成本可通过智慧的设计来降低, Raux 和 Marlot^[33]设想将这些碳配额储存在一张智能 IC 卡中, 即碳账户, 居民使用小汽车时将会消耗相应的额度. 因此, 个人碳排放权交易系统需要一个实时更新可查询的电子数据库, Starkey 和 Anderson^[34]认为目前的信息技术足够支持该系统的建立, 例如嵌入已有的欧盟排放交易体系 (EU ETS)^[35]. 相比数量大且较为分散的下游个体, 王靖添等^[36]从更易于监管的下游企业 (轨道交通、公交、出租、港口、航空等大型运输企业) 角度探讨了中国交通运输行业参与碳排放权交易的现状与对策建议.

2.3 中游碳排放权交易机制

中游碳排放权交易机制是一种折中的方式, 是以汽车制造企业为交易主体. 加州气候行动小组^[37]将此作为交通领域碳排放权交易最为可行的一种机制. Winkelman 等^[16]设想在该机制下, 强制要求汽车制造企业为履约期内生产或销售的车辆在使用阶段产生的碳排放购买碳配额, 以此促进汽车制造企

业改进工艺, 提高车辆燃油经济性, 降低碳排放. Michaelis 与 Zerle^[10]提出根据行业基准线排放与企业历史销量分配初始碳配额, 并且这个基准线将逐年下降, 倒逼汽车制造企业研发低排放车辆, 或者从配额富余的制造商购买碳配额, 否则接受惩罚. 该机制可与燃料税同时实行, 即: 通过燃料税来影响司机的驾驶行为与习惯, 通过汽车制造企业间碳排放权交易影响车辆的能耗及排放标准, 共同实现降低道路交通碳排放的目标. Albrecht^[38]研究发现, 中游碳排放权交易机制可使交通部门在 15 年内减少 25%~38% 的碳排放. 该机制的优点是可避免政策导致燃料价格的上涨, 同时降低管理成本 (因为汽车制造企业数量远小于车辆数), 还可间接刺激消费者选择清洁能源车辆^[10, 39].

然而, 中游碳排放权交易机制也存在一些问题. 首先, 由于汽车制造企业无法获得所生产的车辆在实际运行产生的碳排放数据, 企业碳排放权的分配与清缴难以保证准确性. 另外, 汽车制造企业是应该为新售车辆的碳排放负责, 还是应该为道路上所有生产的车辆碳排放负责? 如果是前者, 将无法覆盖已售出车辆的碳排放; 如果是后者, 则将会扭曲新售车辆的价格^[16]. 另一个问题是制度设计的复杂性: 是否应该计算汽车从生产、运输、使用到报废全生命周期的碳排放? 如何避免与其他部门重复计算碳排放^[16]?

综上所述, 3 种碳排放权交易机制均可实现控制道路交通碳排放总量的目标, 并通过配额交易实现减排成本的最优化, 其主要区别在于受控主体和交易对象的不同. 将 3 种道路交通碳排放权交易机制的配额原则、作用机理、优缺点总结如表 1 所示.

表 1 道路交通碳排放权交易机制对比

Tab.1 Comparison of road transport carbon emissions trading mechanisms

机制	主体	初始配额原则	作用机理	优点	缺点
上游碳排放权交易	燃料供应企业	①基于企业历史排放免费分配; ②免费分配与拍卖结合; ③拍卖.	燃料供应企业改变燃料成分, 降低排放因子.	①管理成本低; ②碳排放覆盖广.	减排效果不显著.
中游碳排放权交易	汽车制造企业	①根据行业基准线排放与企业历史销量分配; ②规定新能源汽车比例, 并按其减排量折算为碳配额.	①汽车制造企业提高车辆燃油经济性; ②汽车制造企业增加新能源汽车产销比例.	①管理成本低; ②促进技术创新.	碳排放覆盖不完全.
下游碳排放权交易	汽车使用者	①按人免费平均分配; ②免费分配与拍卖结合; ③拍卖.	①消费者改变购车选择; ②消费者减少交通活动需求; ③消费者改变居住选址.	①减排激励强; ②减排效果显著.	①管理成本高; ②实施难度大.

3 道路交通碳排放权交易政策建议与研究展望

基于以上文献综述可知, 已有关于道路交通碳

排放权交易机制的研究大多是定性的理论分析, 鲜有基于数据分析的定量评估. 对于目前理论上存在的上游、中游、下游 3 种道路交通碳排放权交易机制, 大部分学者都是针对其中一种机制单独讨论, 尚未有研究系统地把 3 种机制综合起来考虑. 从碳排

放总量控制的角度,虽然任意一种机制单独实施也可以实现减排目标,但往往直接作用于单一要素与主体,减排效率受到限制。例如:上游碳排放权交易机制仅仅把燃料供应企业作为受控主体,通过碳配额的约束与价格信号激励其降低燃料碳排放因子,而对于企业生产低能耗车辆和汽车使用者减少交通需求的激励较弱。

因此,对于道路交通碳排放权交易未来的发展与完善,本文提出如下政策建议与研究设想:同时把燃料供应企业(包括加油站、加气站、加氢站以及为新能源汽车提供电能的充换电站运营企业等)、汽车制造企业(包括化石燃料汽车与新能源汽车制造企业)、汽车使用者(包括私人小汽车出行的居民与运输企业)作为碳排放的受控主体,将上、中、下游3种道路交通碳排放权交易机制融为一体,建立政府—企业—居民协同共治的道路交通碳排放权交易

机制。

该机制由2级市场构成:政府在一级交易市场通过免费或拍卖的形式进行初始碳配额分配;各受控主体根据自身的情况决定是否在二级市场进行交易。由于政府规定了道路交通部门的碳排放总量以及各受控主体的碳排放配额,所有受控主体的碳排放不能超过其配额,进而倒逼受控主体主动减少碳排放,否则必须向其他主体购买多余的碳配额或者接受惩罚。

该机制的作用原理是:在政府对于碳配额的调控下,燃料供应企业通过改变燃料成分来降低燃料排放因子;汽车制造企业通过提高车辆燃油经济性和新能源汽车比例来降低车辆能耗强度;汽车使用者通过减少行程降低交通需求,进而实现道路交通碳排放3个影响因素即燃料排放因子、车辆能耗强度、交通活动需求的协同优化(如图2所示)。

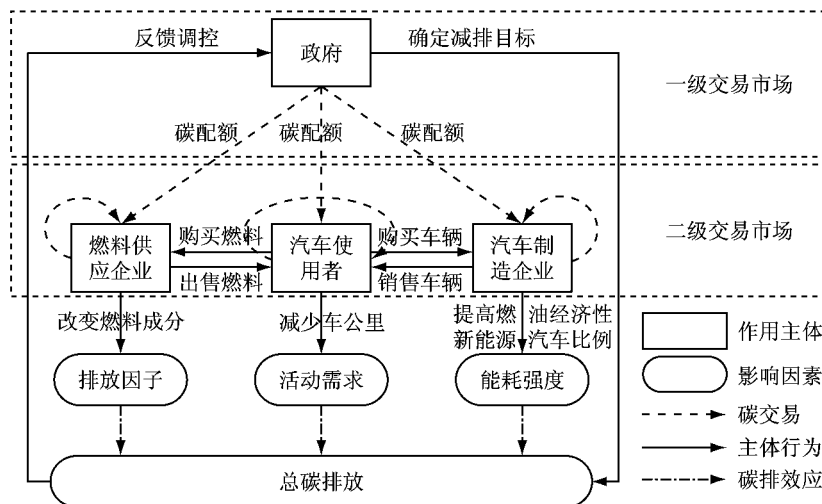


图2 政府—企业—居民协同共治的道路交通碳排放权交易原理

Fig.2 Schematic diagram of road transport carbon emission trading based on government-enterprise-resident collaborative governance

而要构建这样一个2级市场联动、上中下游混合、多主体协同的道路交通碳排放权交易机制,科学、严谨、完善的制度设计至关重要,既要保证碳排放主体的广泛覆盖,又要避免不同受控主体碳排放的重复计算,同时还要兼顾公平、效率和可操作性,提前对其影响效应进行预估。因此,未来研究需要重点解决以下3个关键科学问题:一级市场碳排放权初始分配制度设计、二级市场碳排放权价格形成机制、多主体行为演变规律与协同作用机理。

针对以上科学问题,提出未来的具体研究方向包括:

(1) 基于环境经济学与复杂自适应系统理论构建一个由政府主导、燃料供应企业、汽车制造企业、

汽车使用者等多类受控主体共同参与的道路交通碳排放权交易系统,将上、中、下游3种碳排放权交易机制融为一体,并设计科学合理的市场运行机制。

(2) 基于多主体仿真建模与社会网络分析,建立多主体多规则的道路交通碳排放权交易仿真模型,模拟道路交通碳排放权交易市场的作用机理,并分析市场中不同主体的交互行为,找出影响其选择决策的关键因素及影响机理。

(3) 基于一般均衡理论与系统动力学理论建立道路交通碳排放权交易影响效应评估模型,研究不同参数情景的成本效益,并分析道路交通碳排放权交易机制下的新能源汽车扩散效应,优化道路交通碳排放权交易系统关键参数。

4 结语

由于道路交通碳排放治理涉及燃料供应企业、汽车制造企业、汽车使用者等多类相互作用的异质受控主体,导致现有针对单一主体的非市场化减排政策措施存在效果不确定和反弹效应等问题。而基于市场机制的道路交通碳排放权交易政策可同时作用于多类主体,进而影响碳排放的多个驱动因素,以最大的效率实现道路交通碳减排的目标。由于目前尚未有国家或地区正式将移动排放源纳入碳排放权交易体系,并且理论上存在的上、中、下游 3 种道路交通碳排放权交易机制各有优势与不足,因此,本文提出同时把燃料供应企业、汽车制造企业、汽车使用者作为受控主体,将相互独立的上、中、下游 3 种道路交通碳排放权交易机制进行融合设计,既可以融合单一机制的优点,又可弥补各自的缺点,建立一个政府—企业—居民协同共治的道路交通碳排放权交易机制,进而促进环境资源的合理优化与配置,实现政府治理和社会自我调节、居民自治的良性互动。

参考文献:

- [1] BIROL F. CO₂ emissions from fuel combustion highlights (2016 edition)[R]. Paris: OECD/IEA, 2016.
- [2] LI Y, BAO L, LI W, *et al.* Inventory and policy reduction potential of greenhouse gas and pollutant emissions of road transportation industry in China[J]. Sustainability, 2016, 8 (12): 1218.
- [3] 张陶新. 中国城市化进程中的城市道路交通碳排放研究[J]. 中国人口资源与环境, 2012, 22(8): 3.
ZHANG Taoxin. Research on China's urban road transport carbon emissions under urbanization process [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(8): 3.
- [4] 李晔, 包磊, 李文翔, 等. 中国道路运输行业 CO₂ 和污染减排潜力情景分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44 (2): 242.
LI Ye, BAO Lei, LI Wenxiang, *et al.* Scenario analysis of CO₂ and pollutant emissions mitigation potential for China's road transportation sector[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, 44(2): 242.
- [5] CREUTZIG F, MCGLYNN E, MINX J, *et al.* Climate policies for road transport revisited (I): Evaluation of the current framework[J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2396.
- [6] MOCK P, TIETGE U, GERMAN J, *et al.* Road transport in the EU emissions trading system: An engineering perspective [R]. Washington D C: International Council on Clean Transportation, 2014.
- [7] FLACHSLAND C, BRUNNER S, EDENHOFER O, *et al.* Climate policies for road transport revisited (II): Closing the policy gap with cap-and-trade[J]. Energy Policy, 2011, 39 (4): 2100.
- [8] O'SULLIVAN A. Urban economics[M]. New York: McGraw-Hill Irwin, 2007.
- [9] DROR M B, AN F, DING D, *et al.* Evaluating California's zero-emission vehicle(ZEV) credits and trading mechanism and its potential suitability for China [R]. Beijing: Innovation Center For Energy and Transportation, 2014.
- [10] MICHAELIS P, ZERLE P. From ACEA's voluntary agreement to an emission trading scheme for new passenger cars [J]. Journal of Environmental Planning & Management, 2006, 49 (3): 435.
- [11] HEINRICHS H, JOCHEM P, FICHTNER W. Including road transport in the EU ETS (European Emissions Trading System): A model-based analysis of the German electricity and transport sector[J]. Energy, 2014, 69(1): 708.
- [12] JOCHEM P. Impacts of a carbon dioxide emissions trading scheme in German road transportation [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009(2139): 153.
- [13] MILLARD-BALL A. Municipal mobility manager: New transportation funding stream from carbon trading? [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2079: 53.
- [14] LANKOV I, ZITO R. Designing emissions trading scheme for the transport sector—solutions and outcomes [C]//31st Australasian Transport Research Forum. Gold Coast: Department of Transport (Victoria), Institute of Transport Studies, Monash University, 2008:143-151.
- [15] Market Advisory Committee. Recommendations for designing a greenhouse gas cap-and-trade system for California [R]. Sacramento: California Air Resources Board, 2007.
- [16] WINKELMAN S, HARGRAVE T, VANDERLAN C. Transportation and domestic greenhouse gas emissions trading [R]. Washington D C: Center for Clean Air Policy, 2000.
- [17] GRAYLING T, GIBBS T, CASTLE B. Tailpipe trading: How to include road transport in the EU Emissions Trading Scheme [R]. London: Institute for Public Policy Research, 2006.
- [18] SORRELL S. An upstream alternative to personal carbon trading[J]. Climate Policy, 2010, 10(4): 481.
- [19] GRAHAM D J, GLAISTER S. The demand for automobile fuel: A survey of elasticities[J]. Journal of Transport Economics and Policy (JTEP), 2002, 36(1): 1.
- [20] DOBES L. Tradable permits in transport? [R]. Canberra: Bureau of Transport and Communications Economics, 1998.
- [21] KEPPENS M, VEREECK L. The design and effects of a tradable fuel permit system [C]//European Transport Conference (ETC). Strasbourg: Association for European Transport, 2003:1-18.
- [22] VERHOEF E T, NIJKAMP P, RIETVELD P. Tradeable permits: Their potential in the regulation of road transport externalities[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24(4): 527.
- [23] LI Y, LI W, WEI Y, *et al.* Using personal carbon dioxide trading to promote cleaner cars [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2017, 170(2): 86.
- [24] WATTERS H, TIGHT M. Designing an emissions trading

- scheme suitable for surface transport[R]. Leeds: University of Leeds, 2007.
- [25] HARWATT H. Reducing carbon emissions from personal road transport through the application of a tradable carbon permit scheme: Empirical findings and policy implications from the UK [R]. Leeds: University of Leeds, 2008.
- [26] WADUD Z. Personal tradable carbon permits for road transport: Why, why not and who wins? [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(10): 1052.
- [27] WADUD Z. Personal tradable carbon permits for road transport: Heterogeneity of demand responses and distributional analysis[D]. London: Imperial College London, 2007.
- [28] WADUD Z, NOLAND R B, GRAHAM D J. Equity analysis of personal tradable carbon permits for the road transport sector [J]. Environmental Science & Policy, 2008, 11(6): 533.
- [29] HARWATT H, TIGHT M, BRISTOW A L, *et al.* Personal carbon trading and fuel price increases in the transport sector: An exploratory study of public response in the UK [J]. European Transport, 2011, 47(1): 47.
- [30] FAN J, HE H, WU Y. Personal carbon trading and subsidies for hybrid electric vehicles[J]. Economic Modelling, 2016, 59(1): 164.
- [31] AZIZ H M A, UKKUSURI S V, ROMERO J. Understanding short-term travel behavior under personal mobility credit allowance scheme using experimental economics [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 36(1): 121.
- [32] RAUX C. The potential for CO₂ emissions trading in transport: The case of personal vehicles and freight [J]. Energy Efficiency, 2010, 3(2): 133.
- [33] RAUX C, MARLOT G. A system of tradable CO₂ permits applied to fuel consumption by motorists[J]. Transport Policy, 2005, 12(3): 255.
- [34] STARKEY R, ANDERSON K. Domestic tradable quotas: A policy instrument for reducing greenhouse gas emissions from energy use[R]. Norwich: Tyndall Center, 2005.
- [35] ANGULO E, ESPINOSA-ARANDA J L, GARCÍA-RÓDENAS R, *et al.* Emissions cap-and-trade approaches for managing urban road mobility[J]. Transportation Research Procedia, 2014, 3(1): 770.
- [36] 王靖添, 黄全胜, 马晓明. 中国交通运输参与国内碳交易现状与展望[J]. 中国能源, 2016, 38(5): 32.
WANG Jingtian, HUANG Quansheng, MA Xiaoming. Current situation of China's transportation to participate in domestic carbon trading market and its outlook[J]. Energy of China, 2016, 38(5): 32.
- [37] CALIFORNIA Climate Action Team. Climate action team report to governor Schwarzenegger and the legislature [R]. Sacramento: California Environmental Protection Agency, 2006.
- [38] ALBRECHT J. The diffusion of cleaner vehicles in CO₂ emission trading designs[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2000, 5(1): 385.
- [39] GERMAN J. Reducing vehicle emissions through cap-and-trade schemes[M]//Driving climate change: Cutting carbon from transportation. Burlington: Academic Press, 2007:89-105.